



กลศาสตร์การแตกหัก

จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

กลศาสตร์การแตกหัก

กลศาสตร์การแตกหัก

จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

 **สำนักพิมพ์**
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2564

179.-

จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

กลศาสตร์การแตกหัก / จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

1. การแตกกร้าว. 2. กลศาสตร์. 3. กำลังวัสดุ. 4. ความเครียดและความเค้น. 5. วัสดุ -- ความล้า

620.1126

ISBN (e-book) 978-616-588-391-7

Q 17/04/2564



สรรพคุณคำวิชาการ ผู้สังคม

Knowledge to All

www.cupress.chula.ac.th

หนังสือเล่มนี้ผ่านการตรวจคุณภาพวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดทำโดย

จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทร. 0-2218-6634

ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2564

www.cupress.chula.ac.th [CUP6409-001]

บรรณาธิการอำนวยการ :

นางอรทัย นันทนาดิษฐ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณ หาญสืบสาย

กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ :

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนดา บุนนาค

รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธ์ เดชะคุปต์

รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธ์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ชำเซ็น

พิสูจน์อักษร : โชชิตา วัชรโรทัย

ออกแบบปกและรูปเล่ม : จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

สั่งซื้อได้ที่

ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร. 086 323 3703-4, 0 2255 4433

customer@cubook.chula.ac.th, info@cubook.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

คำนำ

ชิ้นส่วน และโครงสร้างทางวิศวกรรมย่อมเกิดการเสื่อมสภาพหลังจากใช้งานไประยะหนึ่ง รอยร้าวจัดเป็นการเสื่อมสภาพรูปแบบหนึ่งที่มีผลกระทบรุนแรงต่อความแข็งแรงของชิ้นส่วน และโครงสร้าง การรับประกันความปลอดภัยของชิ้นส่วน และโครงสร้างที่พบรอยร้าว จำเป็นต้องทราบอิทธิพลของรอยร้าวต่อความแข็งแรง และพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นส่วน และโครงสร้างให้ได้ในเชิงปริมาณ กลศาสตร์การแตกหักคือแนวทางหนึ่งที่ตอบคำถามนี้ได้

หนังสือเล่มนี้ใช้ประกอบการสอนวิชาการกลศาสตร์การแตกหัก หลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้อ่านควรมีความรู้เกี่ยวกับ วัสดุศาสตร์พื้นฐาน กลศาสตร์วัสดุ ทฤษฎีอีลาสติคิตี และพลาสติกิตีเบื้องต้น คณิตศาสตร์วิศวกรรม และการคำนวณเชิงตัวเลข เนื้อหาแบ่งเป็น 9 บท บทที่ 1 อธิบายองค์ประกอบของวิชา และการประยุกต์ บทที่ 2 สรุปพื้นฐานของกลศาสตร์ของแข็ง บทที่ 3 ถึง 5 แนะนำพารามิเตอร์ปลาย รอยร้าวสำหรับกรณีการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวมีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น จนถึงพฤติกรรมอีลาสติค-พลาสติก บทที่ 6 อธิบายความสามารถของวัสดุในการต้านทาน การแตกหัก หลักการทดสอบ และการวิเคราะห์การแตกหัก บทที่ 7 อธิบายการเติบโตของ รอยร้าวเนื่องจากกลไกความล้า บทที่ 8 อธิบายการเติบโตของรอยร้าวกรณีได้รับอิทธิพล จากสภาพแวดล้อม ในสองบทนี้จะอธิบายวิธีคำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวด้วย บทที่ 9 อธิบายการประเมินสภาพของโครงสร้างที่พบรอยร้าว โดยอิงกับระเบียบวิธี API 579

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล อดีตอาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สอนวิชานี้ให้กับผู้เขียนขณะศึกษาระดับปริญญาโท และสนับสนุนจนได้ไปศึกษาต่อที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ในโครงการ ถ่ายทอดเทคโนโลยี TJTTP-OECF ขอบพระคุณ ศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ที่เป็นแรงบันดาลใจให้รักการเขียนหนังสือตั้งแต่ตอนที่เป็นนิสิต ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา Prof. Yasuhide ASADA, Prof. Shinsuke SAKAI, Assoc. Prof. Toshiya NAKAMURA ที่ให้ โอกาสผู้เขียนเพิ่มพูนความรู้และประสบการณ์ ทำให้เข้าใจความหมายของการศึกษาและการ ทำวิจัยดีขึ้น ขอขอบคุณทีมเจ้าหน้าที่ของ TJTTP-OECF ที่ดูแลความเป็นอยู่ระหว่างเรียนได้ อย่างยอดเยี่ยม ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ ให้โอกาสผู้เขียนใช้เครื่องมือวิจัย จัดสรรพื้นที่ห้องปฏิบัติการ และสนับสนุนเงินทุนให้ ห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลาหนึ่ง ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน ศ.ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ และ ศ.ดร. ขาวสวน กาญจนมัย ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย ขอขอบคุณทุกคนที่ร่วม สร้างผลงานวิชาการ สุดท้าย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ คุณวาสนา ชำเซ็น คุณธีรภัทร์ ภูทอง และคุณโซษิตา วัชรโรทัย ที่ประสานงานและ ตรวจทานหนังสือจนเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

ตุลาคม 2564

คำนำ	ก
บทที่ 1 ภาพรวม	
1.1 รูปแบบของความเสียหาย	1
1.2 ผลของตำหนิต่อความแข็งแรงอุดมคติ	3
1.3 องค์ประกอบของวิชากลศาสตร์การแตกหัก	5
1.4 แขนงของกลศาสตร์การแตกหัก	6
1.5 การประยุกต์กลศาสตร์การแตกหัก	6
1.5.1 การเลือกวัสดุ	6
1.5.2 การออกแบบชิ้นส่วน	7
1.5.2.1 ปรัชญาเสียหายแต่ยังปลอดภัย	7
1.5.2.2 ปรัชญาทนทานความเสียหาย	8
1.5.3 การประเมินการคงสภาพ	9
1.5.4 การติดตามสภาพ	9
1.5.5 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ	10
1.5.6 การวิเคราะห์ความเสียหาย	11
1.6 สรุป	12
เอกสารอ้างอิง	12
แบบฝึกหัด	14
บทที่ 2 กลศาสตร์ของแข็ง	
2.1 ภาพรวม	17
2.2 ความเค้น	18
2.3 ความเครียด	20
2.4 กฎทั่วไปของฮุก	21
2.5 สมการควบคุมของปัญหาอีลาสติคซิติ์สามมิติ	22
2.6 ปัญหาอีลาสติคซิติ์สองมิติในพิกัดคาร์ทีเซียน	24
2.6.1 ปัญหาความเค้นระนาบ	24
2.6.2 ปัญหาความเครียดระนาบ	25
2.7 ฟังก์ชันความเค้นของ Airy	26
2.8 ปัญหาอีลาสติคซิติ์ในพิกัดเชิงขั้ว	28
2.9 วิธีตัวแปรเชิงซ้อน	30
2.9.1 จำนวนเชิงซ้อน	30
2.9.2 ฟังก์ชันเชิงซ้อน	32
2.9.3 ฟังก์ชันความเค้นของ Goursat-Kolosoff-Muskhelishvili	34

2.10 ทฤษฎีพลาสติกซิตีเบื้องต้น	35
2.10.1 เกณฑ์การคราก	35
2.10.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดภายใต้แรงดึง	36
เอกสารอ้างอิง	36

บทที่ 3 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

3.1 แนวทางพลังงานกับวัตถุที่มีรอยร้าว	
3.1.1 อัตราการปลดปล่อยพลังงาน	37
3.1.2 อัตราการปลดปล่อยพลังงานกรณีควบคุมระยะเคลื่อนตัว	38
3.1.3 อัตราการปลดปล่อยพลังงานกรณีควบคุมภาระ	39
3.1.4 อัตราการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคอมพลายแอนซ์	41
3.1.5 เกณฑ์การเติบโตของรอยร้าว	44
3.1.6 ปัญหาที่กริฟฟิศึกษา	45
3.2 การวิเคราะห์ความเค้นของวัตถุที่มีรอยร้าว	46
3.2.1 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว	46
3.2.2 ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์	47
3.2.2.1 ภาพรวม	47
3.2.2.2 วิธีฟังก์ชันความเค้น Williams	48
3.2.2.3 วิธีฟังก์ชันความเค้น Goursat-Kolosov-Muskhelishvili	54
3.2.2.4 วิธีฟังก์ชันความเค้น Westergaard	56
3.2.2.5 วิธีฟังก์ชันความเค้น Sanford	60
3.2.3 บริเวณเอกฐานเด่น	60
3.3 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น	62
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง K และ G	66
3.5 ผลของขนาดจำกัด	69
3.6 หลักการซ้อนทับ	71
3.7 การหาผลเฉลยตัวประกอบความเข้มของความเค้น	81
3.7.1 วิธีฟังก์ชันน้ำหนัก	82
3.7.1.1 วิธีสมมุติระยะเคลื่อนตัวของพื้นผิวรอยร้าว	86
3.7.1.2 วิธีปรับแก้โดยตรง	91
3.7.1.3 การประยุกต์กับโปรไฟล์ความเค้นที่ซับซ้อน	95
3.7.2 วิธีคอมพลายแอนซ์	97
3.7.3 วิธีวัดความเครียด	99
3.7.3.1 ผลเฉลย 3 พารามิเตอร์ และสเตรนเกจหนึ่งตัว	101
3.7.3.2 ผลเฉลย 4 พารามิเตอร์ และสเตรนเกจสองตัว	102
3.7.3.3 ผลเฉลย 2 หรือ 3 พารามิเตอร์ และสเตรนเกจแบบ rectangular rosette	102

3.7.4 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	103
3.7.5 วิธีประกอบ	106
3.7.6 วิธีประมาณผลเฉลย K ของรอยร้าวที่รอยเจาะ	108
3.8 ระยะเคลื่อนตัวของวัตถุที่มีรอยร้าว	111
3.8.1 การคำนวณระยะเคลื่อนตัวของพื้นผิวรอยร้าว ด้วยวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก	111
3.8.2 ทฤษฎีบทกลศาสตร์พลังงาน	112
3.8.3 ทฤษฎีความคล้าย	117
3.9 สรุป	119
เอกสารอ้างอิง	119
แบบฝึกหัด	123

บทที่ 4 กลศาสตร์การแตกหักสำหรับการครากขนาดเล็ก

4.1 สถานะความเค้น และการครากของวัสดุ	137
4.2 บริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าว	139
4.2.1 ขนาดของบริเวณพลาสติก	139
4.2.1.1 วิธีของ Irwin	139
4.2.1.2 วิธีของ Dugdale	141
4.2.2 รูปร่างของบริเวณพลาสติก	142
4.3 พารามิเตอร์ K ประสิทธิภาพ	143
4.4 ขอบเขตของ LEFM และ SSY	147
4.5 ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวสำหรับการครากขนาดเล็ก	149
4.5.1 วิธีของ Irwin	149
4.5.2 วิธีของ Dugdale	150
4.6 สรุป	152
เอกสารอ้างอิง	152
แบบฝึกหัด	153

บทที่ 5 กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก

5.1 นิยามของ J -อินทิกรัล	155
5.2 สมบัติของ J -อินทิกรัล	158
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง J -อินทิกรัล กับ CTOD	160
5.4 การหาผลเฉลย J -อินทิกรัล	162
5.4.1 การหา J -อินทิกรัล จากนิยามปริพันธ์ตามเส้น	162
5.4.1.1 วิธีเชิงวิเคราะห์	162
5.4.1.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	163

5.4.2 การหา J -อินทิกรัล จากนิยามอัตราการปลดปล่อยพลังงานศักย์	174
5.4.2.1 วิธีชิ้นงานหลายชิ้น	174
5.4.2.2 วิธีกึ่งเชิงวิเคราะห์	177
5.4.3 การประมาณ J -อินทิกรัล จากผลเฉลยภาวะขีดจำกัด	182
5.4.4 การประมาณ J -อินทิกรัล จากผลเฉลยพลาสติกเต็ม	184
5.4.5 การประมาณ J -อินทิกรัล ด้วยวิธีความเค้นอ้างอิง	187
5.5 ขอบเขตของ J -อินทิกรัล	191
5.6 สรุป	193
เอกสารอ้างอิง	193
แบบฝึกหัด	195

บทที่ 6 ความต้านทานการแตกหัก และการวิเคราะห์การแตกหัก

6.1 ประเภทของการแตกหัก และเกณฑ์การแตกหัก	201
6.2 การทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก	207
6.2.1 เครื่องทดสอบ และเครื่องมือวัด	207
6.2.2 ชิ้นงาน และการสร้างรอยร้าวเริ่มต้น	207
6.2.3 การติดตามรอยร้าว	210
6.2.4 หลักการทดสอบ และวิธีวิเคราะห์ผล	212
6.2.4.1 การทดสอบ K_{Ic}	212
6.2.4.2 การทดสอบเส้นโค้ง K_R	216
6.2.4.3 การทดสอบ J_{Ic}	221
6.2.4.4 การทดสอบเส้นโค้ง J_R	228
6.2.4.5 วิธีนอร์มัลไลซ์	231
6.2.4.6 วิธีประมาณจากกราฟภาระ-ระยะเคลื่อนตัว	237
6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการแตกหัก	238
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการแตกหักกับอุณหภูมิ	239
6.4.1 เส้นโค้งขอบเขตล่างของ ASME	239
6.4.2 วิธี Master curve	243
6.5 การประมาณความต้านทานการแตกหักจากสมบัติแรงกระแทก	249
6.6 สรุป	251
เอกสารอ้างอิง	252
แบบฝึกหัด	254

บทที่ 7 การเติบโตของรอยร้าว

7.1 ความเสียหายล้า	267
7.2 การทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า	272

7.2.1 หลักการทดสอบ	272
7.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล	274
7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล้า	281
7.4 สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า	288
7.5 การคำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวล้าภายใต้ภาระล้าแอมพลิจูดคงที่	290
7.6 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล้าภายใต้ภาระล้าแอมพลิจูดไม่คงที่	294
7.7 การคำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวล้า ภายใต้ภาระล้าแอมพลิจูดไม่คงที่	298
7.7.1 การนับรอบภาระด้วยวิธี simplified rainflow	298
7.7.2 แบบจำลองการเติบโตของรอยร้าวล้า ภายใต้ภาระล้าแอมพลิจูดไม่คงที่	303
7.7.2.1 แบบจำลองรากของกำลังสองเฉลี่ย	304
7.7.2.2 แบบจำลองที่ไม่คิดปฏิสัมพันธ์ของภาระ	305
7.7.2.3 แบบจำลองของ Wheeler	306
7.7.2.4 แบบจำลองของ Willenborg	308
7.7.2.5 แบบจำลองการปิดของรอยร้าวล้า	309
7.8 แบบจำลองอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากความแข็งแรงล้า	311
7.9 สรุป	317
เอกสารอ้างอิง	318
แบบฝึกหัด	322

บทที่ 8 การเติบโตของรอยร้าวที่ได้รับผลของสภาพแวดล้อม

8.1 กลไกความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน	327
8.2 กลไกความล้าร่วมกับการกัดกร่อน	332
8.3 กลไกการคืบ	337
8.3.1 พารามิเตอร์ C^*	338
8.3.2 การหาผลเฉลย C^*	339
8.3.2.1 การหา C^* จากนิยาม	339
8.3.2.2 การประมาณ C^* จากผลเฉลยพลาสติกเต็มที่	342
8.3.2.3 การประมาณ C^* จากผลเฉลยภาระขีดจำกัด	344
8.3.2.4 การประมาณ C^* ด้วยวิธีความเค้นอ้างอิง	345
8.3.3 การทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวคืบ	348
8.3.4 การคำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวคืบ	352
8.4 กลไกความล้าร่วมกับการคืบ	355
8.5 สรุป	357
เอกสารอ้างอิง	357
แบบฝึกหัด	359

บทที่ 9 การประเมินสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าว	
9.1 เรื่องทั่วไป	361
9.2 หลักการประเมินสภาพโครงสร้างที่มีรอยร้าว	363
9.3 คำแนะนำ และข้อมูลในระเบียบวิธี FFS	365
9.3.1 การแยกประเภทความเค้น	365
9.3.2 การทำความเค้นให้เป็นเชิงเส้น	366
9.3.3 การระบุลักษณะรอยร้าว	368
9.3.4 โพรไฟล์ความเค้นตกค้าง	374
9.3.5 ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว	378
9.3.6 ผลเฉลยความเค้นอ้างอิง	379
9.3.7 ความต้านทานการแตกหัก	381
9.3.7.1 วิธี ASME section XI	381
9.3.7.2 วิธีแรงกระแทกชาร์ปี	383
9.3.7.3 วิธี Master curve	386
9.3.8 อัตราการเติบโตของรอยร้าว	387
9.3.9 แผนภาพประเมินความเสียหาย	388
9.4 ระเบียบวิธี API 579	393
9.4.1 ขอบเขต	393
9.4.2 ขั้นตอนการประเมินสภาพ	394
9.4.2.1 การประเมินระดับ 1	394
9.4.2.2 การประเมินระดับ 2	398
9.4.2.3 การประเมินระดับ 3	404
9.4.3 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ	411
9.4.4 การประเมินสภาพร่ววก่อนแตกหัก	412
9.5 กลศาสตร์การแตกหักเชิงความน่าจะเป็น	413
9.6 สรุป	418
เอกสารอ้างอิง	419
แบบฝึกหัด	421
ภาคผนวก ก ผลเฉลย J_{pl}	425
ภาคผนวก ข การหาผลเฉลย K ด้วยโปรแกรม ANSYS	429
ดัชนี	439
ประวัติผู้เขียน	443

1.1 รูปแบบของความเสียหาย

การออกแบบชิ้นส่วน หรือโครงสร้างเพื่อรับภาระที่กำหนด ผู้ออกแบบต้องคาดการณ์ว่ามีกลไกความเสียหาย (damage mechanism)¹ ไต่บ้างที่มีโอกาสเกิดขึ้นตลอดช่วงอายุใช้งานของชิ้นส่วนหรือโครงสร้าง จากนั้นจึงระบุเกณฑ์ความเสียหาย (failure criteria) ที่เหมาะสมกับกลไกความเสียหายแต่ละชนิดที่คาดการณ์ไว้ สุดท้ายจึงคำนวณมิติของชิ้นส่วน ซึ่งอาจทำควบคู่กับการเลือกวัสดุ

กลไกความเสียหายของวัสดุนั้นมีเป็นจำนวนมาก^[1] เช่น การคราก (yielding) ความล้า (fatigue) การคืบ (creep) การผุกร่อน (corrosion) การสึกหรอ (wear) การโก่ง (buckling) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดกลไกความเสียหายเหล่านี้ ได้แก่ รูปร่างของชิ้นส่วน สมบัติของวัสดุ ภาระที่กระทำ และสภาพแวดล้อมใช้งาน

เกณฑ์ความเสียหาย หมายถึง เงื่อนไขสำหรับระบุว่าชิ้นส่วน หรือโครงสร้างเกิดความเสียหาย หรือไม่ ดังนั้นจึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสถานะ (state) ขณะรับภาระ (ซึ่งอาจแสดงในรูปของความเค้น ความเครียด ฯลฯ) กับความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานกลไกความเสียหายนั้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุ ชิ้นส่วน หรือโครงสร้างจะไม่เสียหายด้วยกลไกความเสียหายที่พิจารณาอีกต่อเมื่อสถานะการรับภาระไม่เกินความสามารถของวัสดุ อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ความเสียหายสามารถสร้างขึ้นโดยใช้ข้อสมมุติที่แตกต่างกันได้ เช่น เกณฑ์การคราก (yielding criteria) ของ Tresca และ von Mises ที่สมมุติให้สถานะการรับภาระระบุอยู่ในรูปของความเค้นเฉือนสูงสุดสัมบูรณ์ (absolute maximum shear) และความเค้นเฉือนบนระนาบออกตะฮีดรัล (octahedral plane) ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ ผู้ออกแบบต้องพิจารณาอย่างรอบคอบว่าเงื่อนไขการออกแบบไม่ขัดแย้งกับข้อสมมุติเบื้องหลังเกณฑ์ความเสียหาย นอกจากนี้ ผู้ออกแบบควรยอมรับว่า แม้จะป้องกันกลไกความเสียหายบางประเภทไว้ดีแล้วในตอนแรก แต่ก็ไม่ได้หมายความว่ากลไกความเสียหายนั้นไม่มีโอกาสเกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าอาจมีเหตุการณ์ที่คาดไม่ถึงถึงมาทำให้ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเสื่อมสภาพด้วยกลไกความเสียหายชนิดอื่นก่อนที่จะเสียหายด้วยกลไกความเสียหายที่ป้องกันไว้ดีแล้ว ตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนถูกออกแบบให้ทนความเสียหายล้าได้ แต่ผู้ออกแบบคาดไม่ถึงว่าสภาพแวดล้อมมีฤทธิ์กัดกร่อนผิวชิ้นส่วนจึงเกิดหลุมผุกร่อน ซึ่งเป็นตัวเพิ่มความเค้น และในที่สุดกลายเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าวล้า^[2] อีกตัวอย่างหนึ่งคือ ผู้ออกแบบคาดไม่ถึงว่าชิ้นส่วนต้องปะทะกับอนุภาคของแข็ง ซึ่งการปะทะนี้ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดหลุมหรือรอยบิ่น และต่อมากลายเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าวล้า^[3]

¹ คำว่า “ความเสียหาย” มีสองความหมายคือ 1) “เสียหายจนใช้งานต่อไปไม่ได้” ซึ่งตรงกับคำภาษาอังกฤษว่า “failure” และ 2) “การเสื่อมสภาพ” ซึ่งตรงกับคำว่า “damage” หรือ “degradation”

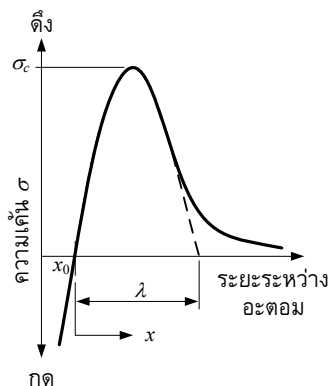
ผู้ใช้งานมักต้องการให้ชิ้นส่วนมีอายุใช้งานยาวนานจนถือว่ามีอายุใช้งานไม่จำกัด (infinite life) แต่การออกแบบชิ้นส่วนให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้อาจทำได้ในบางสถานการณ์ เช่น การออกแบบชิ้นส่วนอากาศยานที่ต้องให้ความสำคัญกับน้ำหนักของชิ้นส่วนมากพอ ๆ กับความแข็งแรงของชิ้นส่วน ดังนั้น หากออกแบบชิ้นส่วนให้มีอายุใช้งานไม่จำกัดแล้วย่อมมีโอกาสสูงขึ้นที่ชิ้นส่วนต้องมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากเกินไป ผู้ออกแบบจึงต้องออกแบบชิ้นส่วนให้มีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งานในช่วงอายุใช้งานออกแบบ

การออกแบบชิ้นส่วนให้มีอายุใช้งานจำกัด (finite life) ต้องคำนึงถึงกระบวนการของความเสียหาย (failure process) ซึ่งเริ่มตั้งแต่ชิ้นส่วนอยู่ในสภาพสมบูรณ์จนถึงตอนที่ชิ้นส่วนใช้งานไม่ได้แล้ว จากนั้นจึงคำนวณระยะเวลาที่ความเสียหายดำเนินไปในแต่ละขั้นตอน ผลรวมของระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนก็คืออายุใช้งานของชิ้นส่วน (service life) ความเสียหายของชิ้นส่วนอาจเกิดจากกลไกความเสียหายเพียงชนิดเดียว หรือหลายชนิดร่วมกัน เช่น ความเสียหายของชิ้นส่วนที่รับภาระเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วยขั้นตอนการกำเนิดรอยร้าว (fatigue crack initiation) และการเติบโตของรอยร้าว (fatigue crack propagation) ความเสียหายของชิ้นส่วนที่รับภาระเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมกัดกร่อน ประกอบด้วยขั้นตอนการกำเนิดหลุมผุกร่อน (corrosion pit initiation) การเติบโตของหลุม การกำเนิดรอยร้าวจากหลุม (crack-pit transition) และการเติบโตของรอยร้าว [4,5] การสะสมความเสียหายในแต่ละขั้นตอนอาจเกิดจากกลไกความเสียหายชนิดเดียวหรือหลายชนิดก็ได้ เช่น กรณีของชิ้นส่วนที่รับภาระเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมกัดกร่อน สภาพแวดล้อมมีบทบาทหลักในขั้นตอนที่หนึ่งและสอง แต่ขั้นตอนที่สามและสี่ สภาพแวดล้อม และภาระเปลี่ยนแปลงมีบทบาทร่วมกัน

เมื่อชิ้นส่วนเสื่อมสภาพถึงระดับหนึ่ง รูปแบบของความเสียหายที่พบเห็นบ่อยก็คือรอยร้าว หากรอยร้าวที่พบบยังมีขนาดไม่ถึงขนาดวิกฤติ ชิ้นส่วนก็สามารถใช้งานต่อได้ แต่ได้อีกนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดภาระ สมบัติวัสดุ สภาพแวดล้อม ฯลฯ ในมุมมองกว้าง ๆ เราอาจสรุปว่า อายุใช้งานของชิ้นส่วนประกอบด้วย อายุการกำเนิดรอยร้าว (crack initiation life) และอายุการเติบโตของรอยร้าว (crack propagation life) ช่วงกำเนิดรอยร้าว เริ่มตั้งแต่ตอนที่ชิ้นส่วนยังไม่มีรอยร้าว จนถึงตอนที่ชิ้นส่วนมีรอยร้าวขนาดหนึ่งปรากฏ จากนั้นจึงเข้าสู่ช่วงรอยร้าวเติบโต ซึ่งเริ่มจากชิ้นส่วนมีรอยร้าวขนาดเริ่มต้นถึงชิ้นส่วนมีรอยร้าวอีกขนาดหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นขนาดรอยร้าวที่ยอมรับ (allowable crack size) ก็ได้ สัดส่วนระหว่างอายุการเติบโตและอายุใช้งานของชิ้นส่วน ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุที่ทำชิ้นส่วน และขนาดความเค้นที่ชิ้นส่วนรับ [6] ชิ้นส่วนที่รับความเค้นสูง และมีพื้นที่รับแรงน้อย เช่น ใบพัดกังหันไอน้ำ (steam turbine blade) รอยร้าวจะเติบโตเร็วทำให้อายุการเติบโตมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับอายุใช้งาน ในทางตรงกันข้าม ชิ้นส่วนที่รับความเค้นต่ำ และมีพื้นที่รับแรงมาก เช่น ตัวเรือนของกังหันไอน้ำ (steam turbine casing) รอยร้าวจะเติบโตช้าทำให้อายุการเติบโตมีสัดส่วนมากเมื่อเทียบกับอายุใช้งาน กลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics) สนใจพฤติกรรมของชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว ได้แก่ ความสามารถในการรับภาระ การตอบสนองต่อภาระ (สถิตและพลวัต) และอายุใช้งานที่เหลือ

1.2 ผลของตำหนิต่อความแข็งแรงอุดมคติ

ความแข็งแรงอุดมคติ (ideal strength) หรือความแข็งแรงทางทฤษฎี (theoretical strength) หมายถึง ความแข็งแรงสูงสุดที่เป็นไปได้ของวัสดุ ความแข็งแรงนี้คำนวณจากความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้^[7]



รูป 1.1 ความเค้นในพันธะระหว่างอะตอม

เงื่อนไขที่ถือว่าวัสดุเสียหาย คือ อะตอมบนระนาบที่อยู่ประชิดกันถูกดึงแยกจากกันจนไม่เหลือแรงดึงดูดระหว่างกัน แรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่อหน่วยพื้นที่ (เทียบเท่ากับความเค้น) กับระยะระหว่างอะตอม มีลักษณะดังเส้นโค้งเส้นเต็มในรูป 1.1 จากรูป x_0 หมายถึง ระยะระหว่างอะตอมในสภาพสมดุล ถ้าระยะระหว่างอะตอมมากกว่าระยะสมดุล ($x > x_0$) จะเกิดความเค้นดึงในพันธะ โดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่มากขึ้นจนถึงค่าสูงสุด σ_c แล้วจึงลดลงจนกระทั่งไม่เหลือแรงดึงดูดระหว่างกัน ดังนั้น σ_c จึงหมายถึงความแข็งแรงของพันธะ การวิเคราะห์ต่อจากนี้จะประมาณเส้นโค้งเส้นเต็มด้วยเส้นโค้งเส้นประ ซึ่งเป็นฟังก์ชันไซน์ที่มีจุดเริ่มต้น ณ พิกัด $(x_0, 0)$ และมีคาบเท่ากับ 2λ รูปสมการของเส้นโค้งเส้นประจึงเขียนได้ดังนี้

$$\sigma = \sigma_c \sin\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right) \quad (1.1)$$

เนื่องจากระยะทางที่อะตอมเคลื่อนที่ x มีค่าน้อย สมการ (1.1) จึงประมาณได้ด้วยสมการ

$$\sigma \approx \sigma_c \left(\frac{\pi x}{\lambda}\right) \quad (1.2)$$

เมื่ออะตอมอยู่ห่างกันมากขึ้น ความเครียดของพันธะจะเท่ากับ x/x_0 ถ้าสมมุติให้ความเค้นและความเครียดสัมพันธ์กันตามกฎของฮุก (Hooke's law) จะได้

$$E = \frac{\sigma}{(x/x_0)} \quad (1.3)$$

โดย E คือ มอดุลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เมื่อแทนสมการ (1.2) ในสมการ (1.3) แล้วจะหาความแข็งแรงของพันธะ σ_c ได้ดังนี้

$$\sigma_c = \frac{E\lambda}{\pi x_0} \quad (1.4a)$$

แต่ λ มีค่าในอันดับเดียวกับ x_0 และถ้ากำหนดให้ค่าทั้งสองเท่ากันโดยประมาณจะได้

$$\sigma_c \approx \frac{E}{\pi} \quad (1.4b)$$

สำหรับเหล็กกล้า (E ประมาณ 200 GPa) สมการ (1.4b) ทำนายว่า σ_c มีค่าอยู่ในอันดับ 10^4 เมกะปาสคาล แต่ทว่าความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength) ของเหล็กกล้ามีค่าอยู่ในอันดับ $10^2 - 10^3$ เมกะปาสคาล ซึ่งน้อยกว่าความแข็งแรงอุดมคติในหลักสิบถึงหลักร้อยเท่า

ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดคำถามว่า “ทำไมความแข็งแรงจริงจึงน้อยกว่าความแข็งแรงอุดมคติ” การทดลองของเลโอนาร์โด ดา วินชี (Leonardo da Vinci)^[8] และกริฟฟิท (Griffith)^[9] ตอบคำถามนี้ได้ในเชิงคุณภาพ (qualitative) ดา วินชี ทดสอบการรับน้ำหนักของลวดเหล็กที่มีความยาวต่างกัน เขากำหนดให้น้ำหนักถ่วงที่ทำให้ลวดขาดหมายถึงความแข็งแรงของลวด เขาพบว่าลวดมีความแข็งแรงลดลงเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น สำหรับกริฟฟิท เขาทดสอบการรับแรงดึงของเส้นใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน เขาใช้ความเค้นขณะแตกหัก (fracture stress) เป็นตัวแทนของความแข็งแรงของวัสดุ เขาพบว่า ความแข็งแรงของเส้นใยแก้วลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น แนวโน้มที่กริฟฟิทพบนี้เหมือนกับกรณีลวดโลหะซึ่งศึกษาโดย Karmarsch ในปี ค.ศ. 1858^[10] ผลงานเหล่านี้บุกเบิกเรื่องผลของขนาด (size effect) ต่อความแข็งแรงของวัสดุ (หรือวัตถุ) แนวโน้มที่พบนี้สามารถอธิบายในเชิงสถิติได้ดังนี้ เมื่อวัตถุมีปริมาตรเพิ่มขึ้น โอกาสที่จะพบตำหนิ (flaw) ขนาดใหญ่พอที่จะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความแข็งแรงจึงแปรผกผันกับขนาด

นอกจากตำหนิภายในแล้ว ตำหนิที่ผิวก็มีผลต่อความแข็งแรงเช่นกัน Loffe^[11] เปรียบเทียบความแข็งแรงของผลึกโซเดียมคลอไรด์ที่ละลายผิวนอกด้วยการจุ่มในน้ำร้อน กับผลึกที่ไม่ได้ละลายผิว เขาพบว่าความแข็งแรงของกรณีหลังอยู่ในอันดับสิบเมกะปาสคาล ส่วนกรณีแรกอยู่ในอันดับพันเมกะปาสคาล เขาอธิบายว่า การละลายผิวนอกของผลึกช่วยกำจัดรอยขีดข่วนหรือรอยร้าวที่ผิว ผลึกจึงแข็งแรงขึ้น

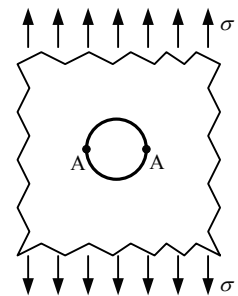
ถึงตอนนี้ แม้จะทราบแล้วว่าตำหนิคือต้นเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงจริงของวัสดุน้อยกว่าความแข็งแรงอุดมคติ แต่นักวิจัยก็ยังระบุผลของตำหนิต่อความแข็งแรงของวัสดุ (หรือของวัตถุ) ในเชิงปริมาณ (quantitative) ไม่ได้ กล่าวคือยังไม่ทราบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความแข็งแรงของวัสดุ (หรือของวัตถุ) กับตัวแปรที่ระบุลักษณะของตำหนิ เช่น ชนิด ขนาด รูปร่าง การจัดวางตัว

ความพยายามแรก คือการใช้แนวคิดของความเค้นหนาแน่น (stress concentration) วิศวกรชาวเยอรมันชื่อ G. Kirsh (ค.ศ. 1898) ศึกษาปัญหาแผ่นแบนขนาดอนันต์มีรูวงกลม รับความเค้นดึงสม่ำเสมอ σ ดังรูป 1.2(ก) เขาพบว่า ความเค้นสูงสุดเกิดที่จุด A และมากกว่าความเค้นที่กระทำอยู่ 3 เท่า^[12] แผ่นแบนที่มีรูเจาะจึงรับภาระได้น้อยกว่าแผ่นแบนที่ไม่มีรู ผลงานนี้ขยายไปสู่การศึกษาปัญหาแผ่นแบนขนาดอนันต์มีรูวงรี^[11] ดังรูป 1.2(ข) โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อ G.V. Kolosov (ค.ศ. 1909) และวิศวกรชาวอังกฤษชื่อ C.E. Inglis (ค.ศ. 1913) นักวิจัยทั้งสองท่านพบว่า ความเค้นสูงสุดเกิดที่จุดปลายแกนเอก (จุด A) และมีขนาดเท่ากับ

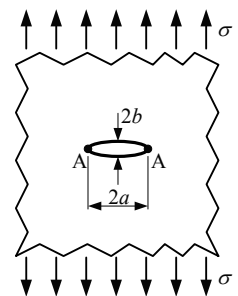
$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (1.5)$$

โดย a และ b คือความยาวครึ่งแกนเอก และครึ่งแกนโท ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุมีความโค้ง ρ ที่จุด A คือ $\rho = b^2/a$ สมการ (1.5) จึงเขียนในรูปของ ρ ได้ดังนี้

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (1.6)$$



(ก)



(ข)

รูป 1.2 แผ่นแบนขนาดไม่จำกัด
(ก) มีรูวงกลม (ข) มีรูวงรี

ถ้าให้วงรีมีความยาวแกนเอก $2a$ เท่าเดิม แต่ลดความยาวแกนโทลงจนกระทั่ง $a \gg b$ แล้วค่าของ ρ จะเข้าสู่ศูนย์ การทำเช่นนี้เปรียบเสมือนการแปลงวงรีในรูป 1.3(ข) ให้กลายเป็นรอยร้าวยาว $2a$ และสมการ (1.6) จะประมาณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\sigma_A \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1.7)$$

เพราะว่าเทอมที่สองกลายเป็นเทอมเด่น อย่างไรก็ตาม ไรก็ดี สมการ (1.7) ไม่สามารถอธิบายอิทธิพลของรอยร้าวต่อความแข็งแรงของวัตถุได้อย่างเหมาะสม เพราะสมการทำนายว่าความเค้นที่ปลายรอยร้าวมีค่านันต์เสมอไม่ว่าวัตถุจะรับภาระน้อยเพียงใด ข้อสรุปนี้ขัดกับประสบการณ์ของเราที่รู้กันดีกว่าสิ่งของรอบตัว เช่น จานกระเบื้อง แก้วน้ำ ที่แม้จะมีรอยร้าว แต่ก็สามารถรับภาระได้ระดับหนึ่ง เหตุผลหนึ่งที่อธิบายเรื่องนี้ได้ก็คือ วัสดุมีความโค้งที่ปลายรอยร้าว ที่แม้จะมีค่าน้อยมากแต่ก็ไม่ได้เท่ากับศูนย์^[7] ทำให้ความเค้นที่ทำนายด้วยสมการ (1.7) มีค่าจำกัด อย่างไรก็ตาม ไรก็ดี การทำนายความแข็งแรงของวัตถุที่มีรอยร้าวด้วยแนวทางนี้จำเป็นต้องทราบค่า ρ ขณะที่วัตถุรับภาระ แต่การวัด ρ ให้แม่นยำนั้นไม่ใช่เรื่องง่ายในทางปฏิบัติ แนวทางนี้จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัตถุที่มีรอยร้าว

1.3 องค์ประกอบของวิชากลศาสตร์การแตกหัก

กลศาสตร์การแตกหักเป็นวิชาในหมวดกลศาสตร์ของแข็ง วิชาที่ต้องอาศัยตัวแปรทางกายภาพ และสมการพื้นฐานของกลศาสตร์ของแข็ง อย่างไรก็ตาม ไรก็ดี องค์ประกอบที่เป็นเอกลักษณ์ของวิชานี้ ได้แก่

- 1) พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (crack tip parameter) ใช้แสดงความรุนแรงของรอยร้าว ปัจจุบันนิยมเรียกว่า แรงขับเคลื่อนรอยร้าว (crack driving force, CDF)
- 2) ความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ใช้แสดงความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานการเติบโตของรอยร้าวจากขนาดเดิม ปัจจุบันนิยมเรียกว่า ความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว (crack growth resistance) สมบัตินี้ขึ้นกับชนิดวัสดุ สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว อัตราการเสียรูป อุณหภูมิ สภาพแวดล้อม กรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) เป็นต้น
- 3) เกณฑ์การแตกหัก (fracture criteria) คือเงื่อนไขที่ใช้บ่งชี้ว่ารอยร้าวจะเติบโตจากขนาดเดิมหรือไม่ และเติบโตอย่างมีเสถียรภาพหรือไม่ เกณฑ์การแตกหักเป็นการเปรียบเทียบแรงขับเคลื่อนรอยร้าวกับความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว และเป็นการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทั้งสองขณะที่รอยร้าวเติบโต
- 4) สหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

รายละเอียดขององค์ประกอบข้างต้นจะอธิบายในบทถัด ๆ ไป โดยองค์ประกอบแรกในบทที่ 3 ถึง 5 และบทที่ 8 (หัวข้อ 8.3.1) องค์ประกอบที่สองและสามในบทที่ 6 และองค์ประกอบที่สี่ในบทที่ 7 และ 8

1.4 แขนงของกลศาสตร์การแตกหัก

แขนงของวิชานี้เมื่อพิจารณาโดยใช้เกณฑ์พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวจะแบ่งออกเป็น

- 1) กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics, LEFM) LEFM ใช้กับกรณีที่วัสดุบริเวณปลายรอยร้าวมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ทฤษฎี LEFM สามารถดัดแปลงให้ใช้กับกรณีปลายรอยร้าวมีบริเวณครากขนาดเล็ก พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของ LEFM คือตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor), K
- 2) กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (elastic-plastic fracture mechanics, EPFM) EPFM ใช้กับกรณีที่วัสดุบริเวณปลายรอยร้าวมีการเสียรูปแบบอีลาสติก-พลาสติก ทฤษฎี EPFM มีบทบาทเมื่อบริเวณครากมีขนาดใหญ่เกินขอบเขตใช้งานของ LEFM พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของ EPFM ที่ใช้แพร่หลายคือ J -อินทิกรัล
- 3) กลศาสตร์การแตกหักที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent fracture mechanics, TDFM) TDFM ใช้กับกรณีที่วัสดุบริเวณปลายรอยร้าวมีการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลา เช่น การเสียรูปคืบ (creep deformation) พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของ TDFM ที่ใช้แพร่หลายคือ C^*
- 4) กลศาสตร์การแตกหักพลศาสตร์ (dynamic fracture mechanics) สนใจพฤติกรรมของรอยร้าวขณะเติบโตด้วยความเร็วสูง หรือเมื่อรับภาระที่มีอัตราการภาระ (loading rate) สูง เช่น ภาระกระแทก (impact loading) พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวจึงขึ้นกับอัตราการเสียรูป และพฤติกรรมของรอยร้าวยังได้รับผลของคลื่นความเค้น (stress wave) ที่เคลื่อนที่ในวัตถุ

1.5 การประยุกต์กลศาสตร์การแตกหัก

วิชานี้สามารถประยุกต์ได้กว้างขวาง เช่น การเลือกวัสดุ การออกแบบ การประเมินสภาพ (integrity assessment) การติดตามสภาพ (health monitoring) การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ (remaining life assessment) และการวิเคราะห์เหตุเสียหาย (failure analysis) หัวข้อย่อยต่อไปนี้อธิบายรายละเอียดของการประยุกต์เหล่านี้

1.5.1 การเลือกวัสดุ

กลศาสตร์การแตกหักทำให้เกิดการพัฒนาวิธีทดสอบหาผลกระทบของรอยร้าวต่อความแข็งแรงของวัตถุ การทดสอบเหล่านี้นำไปสู่สมบัติทางกลใหม่ ๆ ของวัสดุ เช่น ความต้านทานการแตกหัก อัตราการเติบโตของรอยร้าว สมบัติทางกลเหล่านี้ช่วยเพิ่มแง่มุมในการเลือกวัสดุ การปรับปรุงกรรมวิธีทางความร้อน หรือทางกล ให้เหมาะสมกับการใช้งาน^[13] ตัวอย่างเช่น^[14] เหล็กกล้า HSLA-80 และ HSLA-100 ซึ่งนิยมใช้ทำโครงสร้างเรือ นั้น มีอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าใกล้เคียงกันในสภาพแวดล้อมอากาศ แต่ในน้ำเกลือ 3.5 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้า HSLA-80 มีอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าชิ้นส่วนถูกใช้งานในน้ำเกลือ แล้วก็ควรทำชิ้นส่วนด้วยเหล็กกล้า HSLA-80

1.5.2 การออกแบบชิ้นส่วน

ปรัชญาการออกแบบที่นำแนวคิดของกลศาสตร์การแตกหักมาใช้ ได้แก่ ปรัชญาเสียหายแต่ยังปลอดภัย (fail-safe design) และปรัชญาทนทานความเสียหาย (damage-tolerant design)

1.5.2.1 ปรัชญาเสียหายแต่ยังปลอดภัย

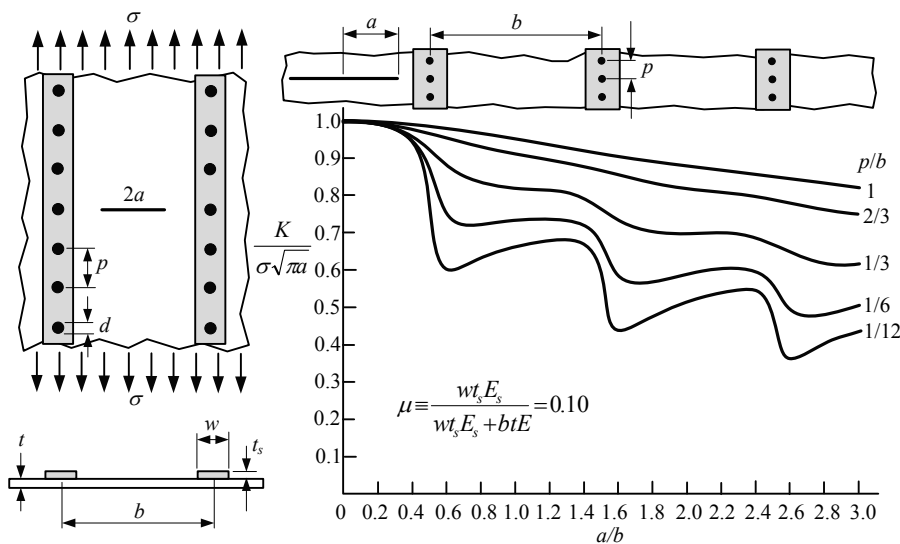
ปรัชญานี้กำหนดว่า แม้ชิ้นส่วนหลักของโครงสร้างจะเสียหาย แต่โครงสร้างก็ยังสามารถทำงานต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง การออกแบบด้วยปรัชญานี้สนใจที่ระยะเวลาหลังจากที่ชิ้นส่วนหลักใช้งานต่อไปไม่ได้ จนถึงตอนที่โครงสร้างทั้งหมดใช้งานต่อไปไม่ได้ ระยะเวลาช่วงดังกล่าวต้องเพียงพอสำหรับการเข้าไปซ่อมแซมได้ทันเวลา หรือก่อนที่โครงสร้างทั้งหมดจะใช้งานต่อไปไม่ได้ (เสียหายอย่างสมบูรณ์) ปรัชญาอย่างอื่น ๆ ที่จัดอยู่ในหมวดของปรัชญานี้ ได้แก่

- 1) การออกแบบให้เกินความจำเป็น (redundant design)
- 2) การออกแบบให้รอยร้าวหยุดเติบโต (crack arrest design)
- 3) การออกแบบให้รั่วก่อนแตกหัก (leak before break design)

การออกแบบให้เกินความจำเป็นใช้วิธีเพิ่มชิ้นส่วนสำรอง² และสมมุติให้ชิ้นส่วนสำรองมีรอยร้าวขนาดเริ่มต้นค่าหนึ่ง จากนั้นวิเคราะห์ว่าชิ้นส่วนสำรองสามารถรับภาระได้หรือไม่เมื่อต้องรับภาระเพียงลำพัง ในขณะที่เริ่มต้นรับภาระเพียงลำพังนั้น ชิ้นส่วนสำรองจะรับภาระมากกว่าปกติเล็กน้อย เช่น 15%^[15] กลศาสตร์การแตกหักมีบทบาทในการวิเคราะห์ว่าชิ้นส่วนสำรองเสียหายหรือไม่ในขณะนี้ และวิเคราะห์ว่าชิ้นส่วนสำรองซึ่งถูกสมมุติให้มีรอยร้าวขนาดเริ่มต้นค่าหนึ่งสามารถรับภาระใช้งานได้นานเพียงใดก่อนที่จะเกิดรอยร้าวจะเติบโตถึงขนาดวิกฤติ หากเวลานี้เพียงพอสำหรับการเข้าไปแก้ไขสถานการณ์ก็จะถือว่าออกแบบได้เหมาะสม

การออกแบบให้รอยร้าวหยุดการเติบโตนิยมใช้การติดตั้งชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรง (stiffener) กับชิ้นส่วนหลัก เมื่อรอยร้าวในชิ้นส่วนหลักเติบโตมาถึงตำแหน่งที่ติดตั้งชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรง ชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงจะแบ่งเบาการรับภาระของชิ้นส่วนหลัก ทำให้ความรุนแรงของรอยร้าวลดลง รอยร้าวจึงชะลอการเติบโต หรือหยุด กลศาสตร์การแตกหักมีหน้าที่วิเคราะห์ว่าชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงสามารถลดค่าของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวได้เพียงใด และวิเคราะห์ระยะเวลาที่รอยร้าวเติบโตจากขนาดเริ่มต้นถึงขนาดวิกฤติ รูป 1.3 แสดงอิทธิพลของชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงที่ติดตั้งในแผ่นแบนขนาดอนันต์รับความเค้นดึงสม่ำเสมอ σ ^[15] อิทธิพลนี้พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของแผ่นแบนเสริมความแข็งแรง และแผ่นแบนที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรง ซึ่งเท่ากับ $\sigma\sqrt{\pi a}$ จากรูป อัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ซึ่งหมายความว่า ชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงสามารถลดแรงขับเคลื่อนรอยร้าวได้ รอยร้าวจึงเติบโตช้าลงในแผ่นแบนที่เสริมความแข็งแรง นอกจากนี้หลังจากเติบโตช้าลงเมื่อเข้าใกล้ชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรง รอยร้าวจะเติบโตเร็วขึ้นหลังจากผ่านชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงแล้ว ระยะระหว่างหมุดย้ำก็มีผลต่อพฤติกรรมของรอยร้าว

² ตัวอย่างที่เห็นชัดแต่ไม่เกี่ยวกับวิชานี้คือ เครื่องบิน 4 เครื่องยนต์ ที่บินได้แม้เครื่องยนต์บางเครื่องดับ



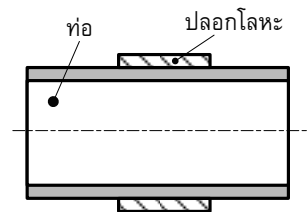
รูป 1.3 ผลของชั้นส่วนเสริมความแข็งแรงต่อพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว [16]

เมื่อหมดแล้วยังอยู่ติดกัน หรือ p/b ลดลง แล้วชั้นส่วนเสริมความแข็งแรงก็ยังมีประสิทธิผลมากขึ้น สำหรับโครงสร้างประเภทท่อ การเสริมความแข็งแรงอาจใช้วิธีรัดด้วยปลอกโลหะดังรูป 1.4 หรือการพันท่อด้วยวัสดุคอมโพสิต [17]

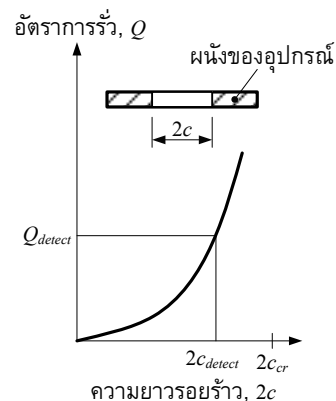
การออกแบบให้รั่วก่อนแตกหักเหมาะสมกับภาชนะความดัน ท่อ และท่อส่ง เพราะถ้าโครงสร้างเหล่านี้เกิดแตกหักอย่างไร้เสถียรภาพแล้ว อาจเกิดการรั่วไหลรุนแรง มีเศษชิ้นส่วนปลิวกระจายด้วยความเร็วสูง ปรักษณานี้กำหนดว่า ภาชนะที่ออกแบบต้องมีขนาดรอยร้าว ณ อัตราการรั่วที่ตรวจจับได้ (detectable leak rate) น้อยกว่าขนาดวิกฤติของรอยร้าว รูป 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับความยาวรอยร้าว การหาความสัมพันธ์นี้อาศัยความรู้ด้านกลศาสตร์ของไหล ถ้าให้ Q_{detect} คืออัตราการรั่วต่ำสุดที่อุปกรณ์ในระบบความปลอดภัยสามารถตรวจจับได้ เราสามารถหาความยาวรอยร้าวขณะนั้นได้จากกราฟรูปนี้ ซึ่งในรูปนี้คือ $2c_{detect}$ เงื่อนไขการรั่วก่อนแตกหักจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อความยาววิกฤติของรอยร้าว $2c_{cr}$ มากกว่า $2c_{detect}$ กลศาสตร์การแตกหักมีหน้าที่วิเคราะห์เสถียรภาพของการเติบโตของรอยร้าวทั้งก่อน และหลังจากทะลุผนังของภาชนะ การเลือกวัสดุที่มีความต้านทานการแตกหักเพียงพอสำหรับการป้องกันไม่ให้รอยร้าวเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพก่อนที่อุปกรณ์จะตรวจพบการรั่วไหล นอกจากนี้ กลศาสตร์การแตกหักยังเกี่ยวข้องกับการคำนวณพื้นที่ของรอยร้าว (leaked area)

1.5.2.2 ปรักษณาทนทานความเสียหาย

ปรักษณานี้กำหนดให้ชั้นส่วนมีรอยร้าวแฝงอยู่ตั้งแต่ก่อนใช้งาน รอยร้าวแฝงนี้ไม่ได้ทำให้ชั้นส่วนเสียหายทันทีที่เริ่มใช้งานในสภาวะที่กำหนด แต่รอยร้าวดังกล่าวสามารถเติบโตได้ขณะใช้งาน ดังนั้น อายุใช้งานที่ปลอดภัยจึงเท่ากับอายุการเติบโตของรอยร้าวจากขนาดเริ่มต้นถึงขนาดที่ยอมรับ (allowable crack size) การออกแบบด้วยปรักษณานี้ไม่ใช่ชั้นส่วนเกินความจำเป็น ความปลอดภัยจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการทำนายอายุการเติบโตของ



รูป 1.4 การรัดท่อด้วยปลอกโลหะเพื่อหยุดการเติบโตของรอยร้าว



รูป 1.5 ภาชนะความดันที่ถูกออกแบบด้วยปรักษณารั่วก่อนแตกหัก

รอยร้าวจากขนาดเริ่มต้นถึงขนาดที่ยอมรับ ความสามารถในการตรวจหา และระบุขนาดรอยร้าว ฯลฯ

การออกแบบเริ่มจากการกำหนดขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และการวางตัวของรอยร้าว การกำหนดข้อมูลเหล่านี้ต้องอาศัยประสบการณ์เฉพาะของแต่ละบริษัท ในเชิงแนวคิด ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าวอาจกำหนดให้เท่ากับขนาดรอยร้าวที่เล็กที่สุดที่ตรวจพบได้ด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing)³ ที่ใช้ในบริษัท ถัดมา คำนวณขนาดวิกฤติของรอยร้าวแล้วหารด้วยตัวประกอบความปลอดภัยเพื่อหาขนาดรอยร้าวที่ยอมรับได้สุดท้าย คำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวจากขนาดเริ่มต้นถึงขนาดที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะใช้งานคาดการณ์ ถ้าระยะเวลาที่ได้มากกว่าหรือเท่ากับอายุใช้งานที่ต้องการแล้ว จึงกำหนดช่วงการตรวจสอบ (inspection interval) แต่ถ้าได้น้อยกว่าก็ปรับแก้การออกแบบหรือการตรวจสอบ เช่น ใช้วิธีตรวจหารอยร้าวที่สามารถพบรอยร้าวขนาดเล็กกว่าได้ ทั้งนี้เพื่อให้ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าวที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าน้อยลง การใช้วัสดุที่มีความต้านทานการแตกหักสูงขึ้นเพื่อเพิ่มขนาดรอยร้าวที่ยอมรับได้ การลดความเค้นในชิ้นส่วนเพื่อให้รอยร้าวเติบโตช้าลง

1.5.3 การประเมินสภาพ

การประเมินสภาพ (integrity assessment) หมายถึงการวิเคราะห์ว่าชิ้นส่วน หรือโครงสร้างสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ สำหรับชิ้นส่วน หรือโครงสร้างที่พบรอยร้าว บทบาทของกลศาสตร์การแตกหัก คือการประยุกต์เกณฑ์การแตกหักเพื่อป้องกันชิ้นส่วน หรือโครงสร้างจะแตกหักหรือไม่ ปัจจัยที่ทำให้การวิเคราะห์ซับซ้อนขึ้น ได้แก่ การเสื่อมสภาพ (degradation) ของวัสดุหลังจากใช้งานเป็นเวลานาน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าว (crack interaction) ซึ่งเกิดเมื่อรอยร้าวอยู่ใกล้กันจนมีผลต่อสนามความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวของกันและกัน ความเค้นตกค้าง ฯลฯ รายละเอียดในเรื่องนี้อยู่ในบทที่ 9

1.5.4 การติดตามสภาพ

การติดตามสภาพ (health monitoring) หมายถึงการตรวจวัดพฤติกรรมของชิ้นส่วน หรือโครงสร้าง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวย้อนกลับไปหาตำแหน่ง ชนิด หรือระดับความเสียหายในโครงสร้าง พฤติกรรมที่ตรวจวัด ได้แก่ ระยะเคลื่อนตัว ความเครียด ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างโหมด (mode shape) กลศาสตร์การแตกหักมีบทบาทเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนหรือโครงสร้างที่มีรอยร้าวเพื่อทำนายพฤติกรรมต่าง ๆ ที่กล่าวมา เมื่อใช้แบบจำลองนี้ร่วมกับข้อมูลตรวจวัด จะสามารถคำนวณย้อนกลับไปหารายละเอียดของรอยร้าวในชิ้นส่วนหรือโครงสร้างได้ เช่น รอยร้าวอยู่ที่ตำแหน่งใด มีความยาวเท่าใด หัวข้อ 3.8 จะอธิบายวิธีเชิงวิเคราะห์เพื่อหาระยะเคลื่อนตัวของวัตถุที่มีรอยร้าวภายใต้ภาระสถิต

³ ปัจจัยที่มีผลต่อโอกาสตรวจพบรอยร้าว (probability of detection, POD) ได้แก่ วิธีตรวจสอบ ความชำนาญของผู้ตรวจสอบ ความคุ้นเคยกับชิ้นส่วนที่ตรวจสอบ การเข้าถึงบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นส่วน เป็นต้น

1.5.5 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ

หลังจากทราบว้าชิ้นส่วน หรือโครงสร้างที่มีรอยร้าวสามารถใช้งานต่อไปได้ สิ่งที่ต้องการทราบถัดมาก็คือ สามารถใช้งานได้อีกนานเพียงใด หรือมีอายุใช้งานที่เหลือ (remaining life) เท่าใด ทั้งนี้เพราะว่ารอยร้าวสามารถเติบโตต่อไปได้เมื่อกลับมาใช้งานโครงสร้างอีกครั้ง โครงสร้างจึงไม่ได้ปลอดภัยตลอดไป กลศาสตร์การแตกหักมีบทบาทเกี่ยวกับการหาขนาดวิกฤติของรอยร้าว และการใช้ข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าว มาคำนวณระยะเวลาที่รอยร้าวเติบโตจากขนาดปัจจุบันถึงขนาดที่ยอมรับได้ ซึ่งหมายถึงอายุใช้งานที่เหลือ การประเมินอายุใช้งานที่เหลือทำให้ใช้งานชิ้นส่วนหรือโครงสร้างได้คุ้มค่า สามารถทำนายผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะใช้งาน และให้ข้อมูลประกอบการวางแผนบำรุงรักษา ^[6]

กรณีศึกษา ^[18] การประกันความปลอดภัยของการเลื่อนกำหนดการซ่อมบำรุง

สถานการณ์

มาตรฐานกำหนดให้ตรวจสอบสภาพใบพัดกังหันไอน้ำที่เปลี่ยนใหม่หลังใช้งานไป 9 เดือน แต่เมื่อถึงกำหนด โรงงานไม่สามารถหยุดการทำงานเพื่อตรวจสอบสภาพได้เพราะมีความต้องการไฟฟ้าสูง โรงงานจึงต้องการทราบว่าจะสามารถเลื่อนกำหนดการตรวจสอบออกไปได้หรือไม่

แนวทางการแก้ปัญหา

คำนวณอายุใช้งานที่เหลือของใบพัดจากความยาวเริ่มต้นถึงความยาวที่ยอมรับ หากอายุใช้งานที่เหลือมากกว่าเวลานับจากปัจจุบันถึงกำหนดการตรวจสอบที่เหมาะสมกว่า ก็แสดงว่าเลื่อนกำหนดการออกไปได้

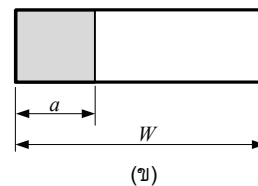
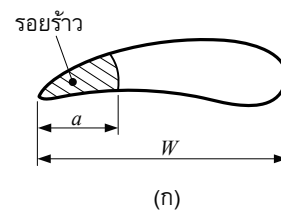
รายละเอียด

หน้าตัดของใบพัด ตำแหน่ง และลักษณะของรอยร้าวในใบพัด แสดงอยู่ในรูป E.1(ก) แต่เนื่องจากไม่มีผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของปัญหานี้ จึงประมาณหน้าตัดของใบพัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีรอยร้าวทะลุความหนา ขอบหน้าตรง ดังรูป E.1(ข) ความยาวรอยร้าวเริ่มต้นกำหนดให้เท่ากับขีดจำกัดของวิธีตรวจสอบแบบไม่ทำลายของโรงงาน ซึ่งก็คือ 1.6 มม.

ค่าขอบเขตล่าง (lower bound) ของความต้านทานการแตกหักในสภาพแวดล้อมใช้งาน (อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส) เท่ากับ $132 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

ภาระที่กระทำกับใบพัด ประกอบด้วย แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และโมเมนต์ดัดจากการสั่นสะเทือนของใบพัด แรงเหวี่ยงทำให้เกิดความเค้นเฉลี่ย 169.6 MPa การสั่นสะเทือนทำให้เกิดพิสัยความเค้น 1.45 MPa และมีความถี่ 76 เฮิรตซ์

เกณฑ์การแตกหักคำนวณความยาววิกฤติของรอยร้าวได้ 55 มม. ระยะเวลาที่รอยร้าวเติบโตจากความยาว 1.6 มม. ถึงครึ่งหนึ่งของความยาววิกฤติคือ 22.8 ปี แต่กำหนดการที่เหมาะสมในการบำรุงรักษามาถึงก่อน จึงสรุปว่าเลื่อนกำหนดการตรวจสอบได้



รูป E.1 (ก) หน้าตัดที่มีรอยร้าวของใบพัด และ (ข) หน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.5.6 การวิเคราะห์ความเสียหาย

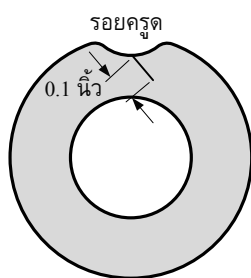
กลศาสตร์การแตกหักสามารถใช้เป็นเครื่องมือประกอบหลักฐานอื่นในการวิเคราะห์เหตุเสียหายของชิ้นส่วน^[19] ตัวอย่างเช่น ถ้าวิเคราะห์แล้วพบว่าขนาดวิกฤติของรอยร้าวภายใต้ภาระใช้งานมากกว่าขนาดรอยร้าวในชิ้นส่วนที่เสียหาย ก็จะตั้งข้อสันนิษฐาน หรือตั้งคำถามว่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุต่ำกว่าที่กำหนดในการออกแบบ หรือไม่ มีความเค้นตกค้างมาเสริมให้รุนแรงขึ้น หรือไม่ สภาวะใช้งานรุนแรงกว่าที่กำหนดในการออกแบบหรือไม่

กรณีศึกษา^[20] การวิเคราะห์ความเสียหาย และข้อแนะนำในการเลือกวัสดุ

ภาชนะความดันเกิดการแตกหักอย่างฉับพลันในระหว่างการทดสอบพิสูจน์ (proof test)⁴ ความดันขณะที่เกิดการแตกหักมีค่าเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์ของความดันพิสูจน์ (proof pressure) การวิเคราะห์ผิวแตกหักระบุว่าจุดเริ่มต้นของการแตกหักอยู่ที่ผิวด้านนอกของภาชนะ และพบรอยร้าวขนาดเล็กรูปครึ่งวงรียาว 6.1 มม. ลึก 0.76 มม. การประยุกต์กลศาสตร์การแตกหัก เริ่มจากการคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว K_{Ic} ความดันที่ทำให้ภาชนะแตกหัก ซึ่งได้เท่ากับ $43.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ เมื่อเทียบกับความต้านทานการแตกหักของวัสดุนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ $42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ จึงสรุปได้ว่า ภาชนะแตกหักเพราะรอยร้าวมีขนาดใหญ่เกินขนาดที่ภาชนะสามารถทนได้ นอกจากนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกหักฉับพลัน ภาชนะควรทำด้วยวัสดุที่มีความต้านทานการแตกหักสูงขึ้น หรือเพิ่มความต้านทานการแตกหักของวัสดุที่ใช้อยู่ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

กรณีศึกษา^[21] การระบุสาเหตุของความเสียหาย

ในโครงการวางท่อใต้ดินเส้นใหม่ ท่อใต้ดินที่ฝังอยู่เดิมถูกกระแทกด้วยพื้นของที่ตักดินของรถขุดจนเกิดเป็นรอยครูด (gouge) ตามแนวยาวของท่อ หลังจากโครงการใหม่สิ้นสุดไม่นาน ท่อดังกล่าวเกิดการแตกหัก ภาพถ่ายโลหะวิทยา (metallographic image) บ่งชี้ว่ามีรอยร้าวเฉียง 45 องศา ยาว 0.1 นิ้ว กำเนิดจากรอยครูด ดังรูป E.1 พื้นผิวแตกหักนอกบริเวณรอยร้าวมีลักษณะเหมือนกับการแตกหักเนื่องจากรับภาระเกินพิกัด กลศาสตร์การแตกหักถูกใช้เพื่อตรวจสอบว่าการแตกหักของท่อที่มีรอยร้าวนี้เกิดจากการรับภาระเกินหรือไม่ เริ่มจากทดสอบหาความต้านทานการแตกหักของวัสดุบริเวณรอยครูด จากนั้นคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว สุดท้ายคำนวณความดันวิกฤติจากเกณฑ์การแตกหัก ผลลัพธ์คือ 1,060 psi ซึ่งน้อยกว่าความดันใช้งานสูงสุด 1,460 psi จึงสรุปว่า การแตกหักเกิดจากการรับความดันเกินพิกัด



รูป E.1 หน้าตัดของท่อที่มีรอยครูด

⁴ ในการทดสอบ จะให้ภาชนะความดันรับความดันสูงกว่าความดันใช้งาน หากภาชนะไม่เสียหายที่ความดันพิสูจน์ก็จะถือว่าภาชนะไม่มีรอยร้าวขนาดวิกฤติ และใช้งานที่ความดันใช้งานได้

1.6 สรุป

การออกแบบชิ้นส่วน หรือโครงสร้างให้ใช้งานได้ปลอดภัย ผู้ออกแบบจะต้องระบุกลไกความเสียหายที่มีโอกาสเกิดขึ้นให้ครบถ้วน และเลือกเกณฑ์ความเสียหายที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลไก ตัวอย่างในวัสดุ คือต้นเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง การทำนายผลของตำหนิในรูปของรอยร้าวต่อความสามารถในการรับภาระของชิ้นส่วน หรือโครงสร้างทำได้โดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก องค์ประกอบของวิชานี้ ได้แก่ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว ความต้านทานการแตกหัก เกณฑ์การแตกหัก และสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว แขนงของวิชาซึ่งจำแนกตามพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าว ทำให้แบ่งแขนงของวิชาออกเป็น กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก กลศาสตร์การแตกหักที่ขึ้นกับเวลา และกลศาสตร์การแตกหักพลวัต กลศาสตร์การแตกหักสามารถประยุกต์ในงานวิศวกรรมได้หลากหลาย เช่น การออกแบบ การประเมินสภาพ การติดตามสภาพ และการวิเคราะห์ความเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Collin “*Mechanical design of machine elements and machines*,” Wiley, 2002
- [2] J.A. Newman, R. Piascik, and R.A. Lindenberg “Failure analysis of a helicopter external fuel-tank pylon,” *NASA TM-2002-211645*, 2002.
- [3] G. Das, S.G. Chowdhury, A.K. Ray, S.K. Das, and D.K. Bhattacharya “Turbine blade failure in a thermal power plant,” *Eng. Fail. Ana.*, vol. 10, 2003, pp. 85-91.
- [4] G.S. Chen, K.C. Wan, M. Gao, R.P. Wei, and T.H. Flournoy “Transition from pitting to fatigue crack growth – modeling of corrosion fatigue crack nucleation in a 2024-T3 aluminium alloy,” *Mat. Sci. Eng. A*, vol. 219, 1996, pp. 126-132.
- [5] R. Akid, I.M. Dmytrakh, and J.G.-Sanchez “Fatigue damage accumulation: Aspects of environmental interaction,” *Mater. Sci.*, vol. 42, 2006, pp. 42-53.
- [6] R. Viswanathan, “*Damage mechanisms and life assessment of high temperature components*,” ASM international, 1989.
- [7] T.L. Anderson “*Fracture mechanics: Fundamental and application*,” 3rd ed., CRC Press, 2004.
- [8] S.P. Timoshenko “*History of strength of materials*,” McGraw-Hill, 1953.
- [9] A.A. Griffith “The phenomena of rupture and flow in solids,” *Philos. T. Roy. Soc.*, vol. 221, 1921, pp. 180-183.
- [10] E.E. Gdoutos “*Fracture mechanics: An introduction*,” 2nd ed., Springer, 2005.
- [11] V.Z. Parton “*Fracture mechanics: From theory to practice*,” Gordon and Breach Science Publisher, 1992, p. 17-20.
- [12] S.P. Timoshenko, and J.N. Goodier “*Theory of elasticity*,” 3rd ed., McGraw-Hill International Edition, 1970.
- [13] W.W. Gerberich, and A.W. Gunderson “Design, materials selection and failure analysis,” *Application of fracture mechanics for selection of metallic structural materials*, Eds. J.E. Cambell, W.W. Gerberich, and J.H. Underwood, American Society for Metals, 1982, pp. 311-365.
- [14] S. Sivaprasad, S. Tarafder, V.R. Ranganath, M. Tarafder, and K.K. Ray “Corrosion fatigue crack growth behavior of naval steels,” *Corros. Sci.*, vol. 48, 2006, pp. 1996-2013.
- [15] Damage tolerance design handbook.
Available from <http://www.afgrow.net/applications/DTDHandbook/>
- [16] C.C. Poe “Stress-intensity factor for a cracked sheet with riveted and uniformly spaced stringers,” *NASA TR R-358*, 1971.

- [17] F.V.D. Abeelee, and M. Biagio “*Design of crack arrestors for ultra-high grade gas transmission pipelines: Material selection, testing and modelling*,” Sustainable construction and design, 2011. Available from https://scad.ugent.be/journal/2011/SCAD_2011_2_2_296.pdf
 - [18] C.S. Shin “Continual service reassurance of steam turbine blade,” *Eng. Fail. Ana.*, vol. 3, 1996, pp. 95-102.
 - [19] U. Zerbst, C. Klinger, and R.E. Clegg “Fracture mechanics as a tool in failure analysis- Prospects and limitations,” *Eng. Fail. Ana.*, vol. 55, pp. 376-410.
 - [20] G.J. Feng, Rossi, J.D., and M.T. Gerusky, M.T. “Failure analysis of beta-C titanium alloy high pressure vessels,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 3, 1994, pp. 105-109.
 - [21] B.A. James, R.A. Sire, and R.D. Caliguiri “Determination of the failure mode and the rupture pressure in a mechanically damaged pipeline,” *J. Fail. Ana. Prevent*, vol. 8, 2008, pp. 223-230.
-

1. จงสืบค้นกรณีศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของชิ้นส่วนกล เช่น เฟลา เพือง ตลับลูกปืน โช้สติก ฯลฯ จากนั้นสรุปข้อมูลของชิ้นส่วน (มิติ รูปร่าง วัสดุ กรรมวิธีการผลิต) สภาวะใช้งาน กลไกความเสียหาย และสุดท้าย พิจารณาว่ามีการประยุกต์กลศาสตร์การแตกหักหรือไม่ ถ้ามีให้ระบุไว้ให้หาสิ่งใด

2.⁵ กำหนดตัดกลมทำจากเหล็กกล้าเกิดแตกหักขึ้นในระหว่างที่คณงานกำลังเพิ่มแรงดึงเพื่อสร้างความเค้นดึงขั้นต้น (prestress) ให้กับโครงสร้างหลัก การแตกหักเกิดขึ้นขณะที่แรงดึงยังมีค่าต่ำกว่าแรงดึงที่กำหนด ผลการวิเคราะห์พื้นผิวแตกหักพบว่าจุดกำเนิดการแตกหักคือรอยร้าวขนาดเล็กรูปครึ่งวงรี ดังรูป P.1

2.1 ถ้ากำหนดให้การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมีขนาดเท่ากับความต้านทานการแตกหักของวัสดุ แล้วจะได้แรงดึงที่ทำให้เกิดแตกหัก P_c คือ

$$P_c = \frac{D\sqrt{\pi D}}{4} K_c \cdot M$$

$$\text{และ } M = \frac{\sqrt{D/a}}{[1.0806 + 0.6386(a/D) - 2.4445(a/D)^2 + 13.463(a/D)^3]}$$

โดย D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนเหล็ก กำหนดให้เท่ากับ 36 มม.

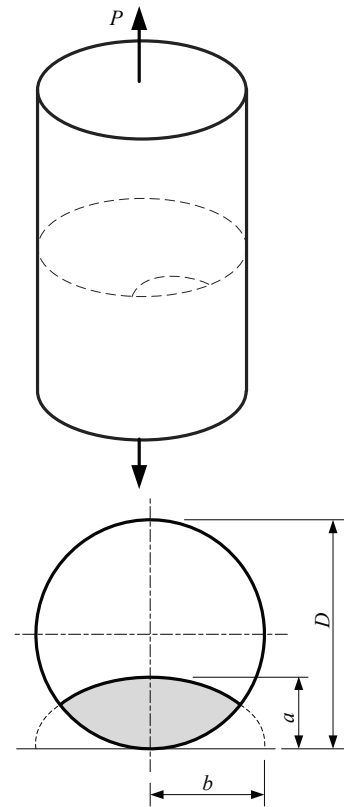
K_c คือ ความต้านทานการแตกหักของวัสดุ กำหนดให้เท่ากับ $33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

a คือ ความลึกของรอยร้าว

จงพล็อตกราฟระหว่าง P_c กับ a และอธิบายความหมายของแนวโน้มที่พบ

2.2 ถ้าทราบว่ามีการหักเหล็กลูกเสียสองท่อน ท่อนแรกเสียหายที่แรงดึง 600 กิโลนิวตัน และมีรอยร้าวลึก 0.92 มม. ท่อนที่สองเสียหายที่แรงดึง 400 กิโลนิวตัน และมีรอยร้าวลึก 1.50 มม. จงตรวจสอบว่าความสัมพันธ์ในข้อ 2.1 สามารถทำนายภาระแตกหักของก้านได้แม่นยำเพียงใด

2.3 จงพล็อตกราฟ P_c กับ a สำหรับกรณี $K_c = 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ บนแกนเดียวกับกราฟในข้อ 2.1 จากนั้นอธิบายผลของ K_c ต่อความลึกวิกฤติของรอยร้าว



รูป P.1 ก้านรับแรงดึง และลักษณะรอยร้าวบนหน้าตัดที่เสียหาย

⁵ A. Valiente, and M. Elices, "Premature failure of prestressed steel bars," *Eng. Fail. Ana.*, vol. 5, 1998, pp. 219-227.

3. ^[10] การทดลองของกริฟฟิทเกี่ยวกับความแข็งแรงของใยแก้ว σ_f ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ต่าง ๆ ได้ผลลัพธ์ดังตาราง P.1 ผลลัพธ์สามารถประมาณได้ด้วยสมการ $\sigma_f = A + B/d$ จงหาค่าคงตัว A และ B ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

ตาราง P.1

เส้นผ่านศูนย์กลาง d ($\times 10^{-3}$ นิ้ว)	ความเค้นแตกหัก σ_f (ksi)	เส้นผ่านศูนย์กลาง d ($\times 10^{-3}$ นิ้ว)	ความเค้นแตกหัก σ_f (ksi)
40.00	24.9	0.95	117
4.20	42.3	0.75	134
2.78	50.8	0.70	164
2.25	64.1	0.60	185
2.00	79.6	0.56	154
1.85	88.5	0.50	195
1.75	82.6	0.38	232
1.40	85.2	0.26	332
1.32	99.5	0.165	498
1.15	88.7	0.130	491

4. จงวิเคราะห์กลไกความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นได้กับตะขอเกี่ยวหน้าต่าง และห่วงเกี่ยว ในรูป P.2 ให้อธิบายรายละเอียดของสภาวะการใช้งานที่นำไปสู่กลไกความเสียหายที่ระบุด้วย



รูป P.2